

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.453-13
(12/2017)

Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции

Серия Р
Распространение радиоволн



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.453-13

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012-2015-2016-2017)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.453 представлены методы оценки индекса рефракции радиоволн и его поведения в разных местах по всему миру; приведено описание характеристик поверхности и вертикального профиля; а также представлены мировые карты распределения параметров рефракции и их статистическое отклонение.

Ключевые слова

Индекс рефракции радиоволн, поверхность, вертикальный профиль, параметры рефракции, статистическое отклонение

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая

- a) необходимость использования только одной формулы для расчета индекса рефракции атмосферы;
- b) потребность в эталонных данных о рефракции и градиентах рефракции по всему миру;
- c) необходимость математического метода описания статистического распределения градиентов рефракции,

рекомендует,

- 1 вычислять индекс рефракции радиоволн в атмосфере n с помощью формулы, приведенной в Приложении 1;
- 2 использовать данные о рефракции, представленные на картах мира и мировых численных картах Приложения 1, за исключением тех случаев, когда имеются более надежные местные данные;
- 3 использовать при вычислении статистического распределения градиентов рефракции метод, представленный в Приложении 1;
- 4 в отсутствие местных данных о температуре и относительной влажности использовать приведенную в пункте 2.2 Приложения 1 мировую численную карту с указанием влажностной составляющей приповерхностной рефракции радиосигнала, которая превышает в течение 50% времени года (см. рисунок 3).

Приложение 1

1 Формула для вычисления индекса рефракции радиоволн

Индекс рефракции радиоволн в атмосфере n можно вычислить по следующей формуле:

$$n = 1 + N \times 10^{-6}, \quad (1)$$

где рефракция радиоволн N равна

$$N = 77,6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (N\text{-единиц}), \quad (2)$$

составляющая рефракции радиоволн, учитывающая сухой воздух N_{dry} равна

$$N_{dry} = 77,6 \frac{P_d}{T}, \quad (3)$$

а составляющая рефракции радиоволн, учитывающая влажный воздух N_{wet} равна

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (4)$$

где:

P_d : атмосферное давление сухого воздуха (гПа);

P : общее атмосферное давление (гПа);

e : давление водяных паров (гПа);

T : абсолютная температура (К);

и

$$P = P_d + e. \quad (5)$$

Поскольку $P_d = P - e$, уравнение (2) может быть представлено в следующем виде:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2}. \quad (6)$$

Уравнение (6) может аппроксимироваться с меньшей точностью в следующем виде:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right). \quad (7)$$

Уравнение (7) дает значения N в пределах 0,02% от значения, полученного из уравнения (2), для диапазона температур от -50 °С до $+40$ °С. В отношении характерных профилей температуры, давления и давления водяных паров см. Рекомендацию МСЭ-R P.835.

Для простоты расчетов соотношение между давлением водяных паров e и относительной влажностью можно представить как

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100}, \quad (8)$$

где:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{\left(b - \frac{t}{d} \right) \cdot t}{t + c} \right] \quad (9)$$

и

$$EF_{\text{вода}} = 1 + 10^{-4} \left[7,2 + P \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2) \right];$$

$$EF_{\text{лед}} = 1 + 10^{-4} \left[2,2 + P \cdot (0,0383 + 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2) \right],$$

где:

 t : температура (°C); P : общее атмосферное давление (гПа); H : относительная влажность (%); e_s : давление насыщенного пара (гПа) при температуре t (°C), а коэффициенты a , b , c и d следующие:

для воды

$a = 6,1121;$

$b = 18,678;$

$c = 257,14;$

$d = 234,5;$

для льда

$a = 6,1115;$

$b = 23,036;$

$c = 279,82;$

$d = 333,7;$

(справедливо в диапазоне от -40° до $+50^\circ$) (справедливо в диапазоне от -80° до 0°) P определено как общее атмосферное давление, однако может использоваться значение давления сухого атмосферного воздуха, и точность прогнозирования при этом ухудшается незначительно.Давление водяных паров e получаем из плотности водяных паров ρ с использованием следующего уравнения:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{гПа}, \quad (10)$$

где ρ выражено в г/м³. Типичные значения ρ приводятся в Рекомендации МСЭ-R P.836.

2 Приповерхностная рефракция и ее зависимость от высоты

2.1 Рефракция как функция от высоты

Было показано, что долгосрочная усредненная зависимость индекса рефракции n от высоты h хорошо определяется экспоненциальным законом:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0), \quad (11)$$

где:

 N_0 : среднее значение атмосферной рефракции, экстраполированное для уровня моря; h_0 : приведенная высота (км).Значения N_0 и h_0 для различных климатических условий можно определить статистическими методами. В качестве эталона можно использовать усредненный в глобальных масштабах высотный профиль рефракции, определяемый как

$$N_0 = 315;$$

$$h_0 = 7,35 \text{ км.}$$

Эти численные значения применимы только для наземных трасс.

Этот эталонный профиль можно использовать для вычисления значения рефракции N_s у поверхности Земли по значению N_0 следующим образом:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0), \quad (12)$$

где:

h_s – высота поверхности Земли над уровнем моря (км).

Вместе с тем следует отметить, что контуры, представленные на рисунках 1 и 2, были получены с использованием значения $h_0 = 9,5$ км. Рисунки 1 и 2 были получены на основе набора данных, собранных за 5 лет (1955–1959 годы) приблизительно от 1000 станций, расположенных на поверхности Земли. (Рисунки 1 и 2 отсутствуют в численной форме.)

Для трасс Земля–спутник индекс рефракции на любой высоте вычисляется с помощью уравнений (1), (2) и (10), выше, при соответствующих значениях параметров, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.835, Приложение 1. Полученные таким образом индексы рефракции можно далее использовать для численного моделирования траекторий лучей в атмосфере.

(Следует отметить, что экспоненциальный профиль, приведенный в уравнении (12), можно также использовать для получения быстрых приблизительных оценок градиента рефракции вблизи поверхности Земли и видимого угла направления максимума излучения, как указано в пункте 4.3 Рекомендации МСЭ-R P.834.)

2.2 Влажностная составляющая приповерхностной рефракции

Годовые и помесечные значения влажностной составляющей приповерхностной рефракции N_{wet} (ppm), превышаемые для 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 и 99% времени среднего года и среднего месяца, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении R-Rec. P.453-13-201712-I!ZIP-E.zip.

Данные представлены для значений долготы от -180° до $+180^\circ$ и широты от -90° до $+90^\circ$, разрешение по широте и долготе составляет $0,75^\circ$. Значение влажностной составляющей приповерхностной рефракции в любой рассматриваемой точке на поверхности Земли может быть выведено с помощью следующего метода интерполяции:

- определяются две вероятности p_{above} и p_{below} – выше и ниже желательной вероятности p из множества 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 и 99%;
- для этих двух вероятностей p_{above} и p_{below} определяются значения влажностной составляющей приповерхностной рефракции N_{wet1} , N_{wet2} , N_{wet3} и N_{wet4} в четырех ближайших точках сетки координат;
- определяются значения влажностной составляющей приповерхностной рефракции $N_{wetabove}$ и $N_{wetbelow}$ при вероятностях p_{above} и p_{below} путем билинейной интерполяции четырех значений влажностной составляющей приповерхностной рефракции N_{wet1} , N_{wet2} , N_{wet3} и N_{wet4} в четырех точках сетки, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144;
- определяется влажностная составляющая приповерхностной рефракции N_{wet} при желательной вероятности p путем интерполяции $N_{wetabove}$ и $N_{wetbelow}$ в зависимости от p_{above} и p_{below} к p в линейном масштабе зависимости N_{wet} от $\log p$.

Годовые и помесечные значения влажностной составляющей приповерхностной рефракции получены на основе данных за 36 лет (1979–2014 годы) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

Для информации на рисунке 3 изображены медианные значения (50%) влажностной составляющей приповерхностной рефракции, превышаемой в течение обычного года.

РИСУНОК 1
Помесячные средние значения N_0 , февраль

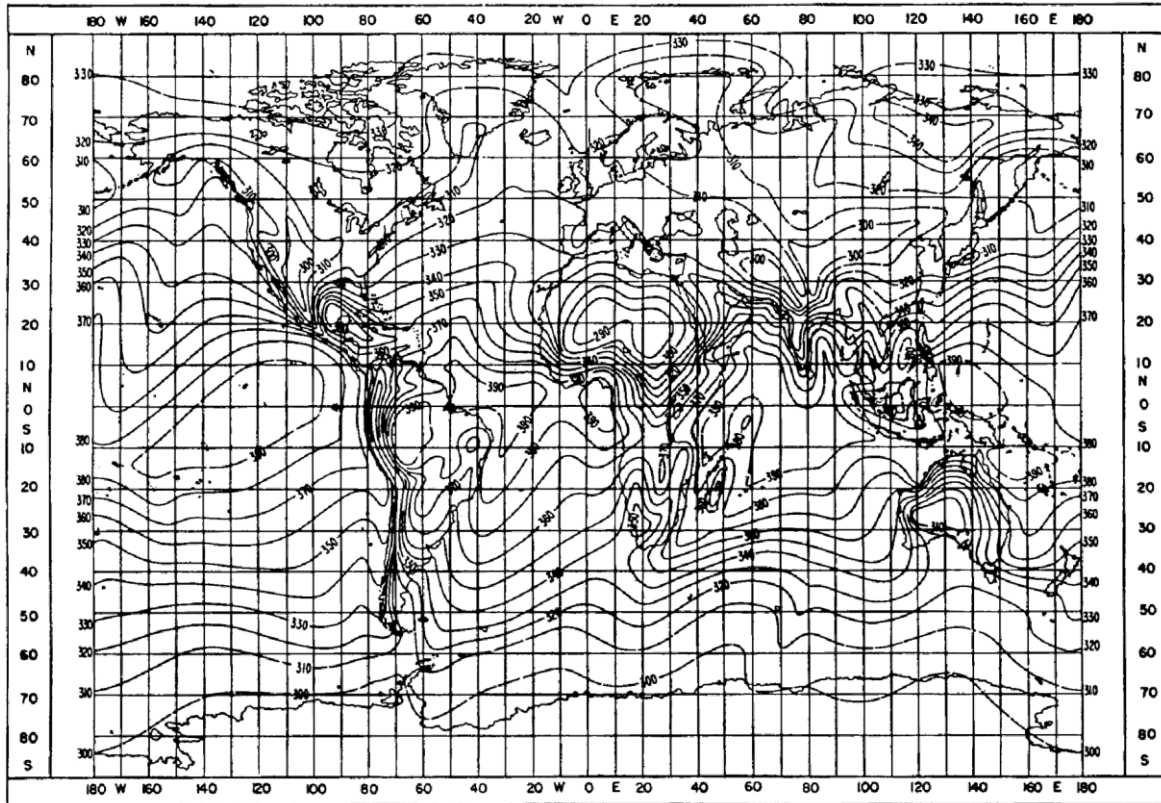


РИСУНОК 2

Помесячные средние значения N_0 , август

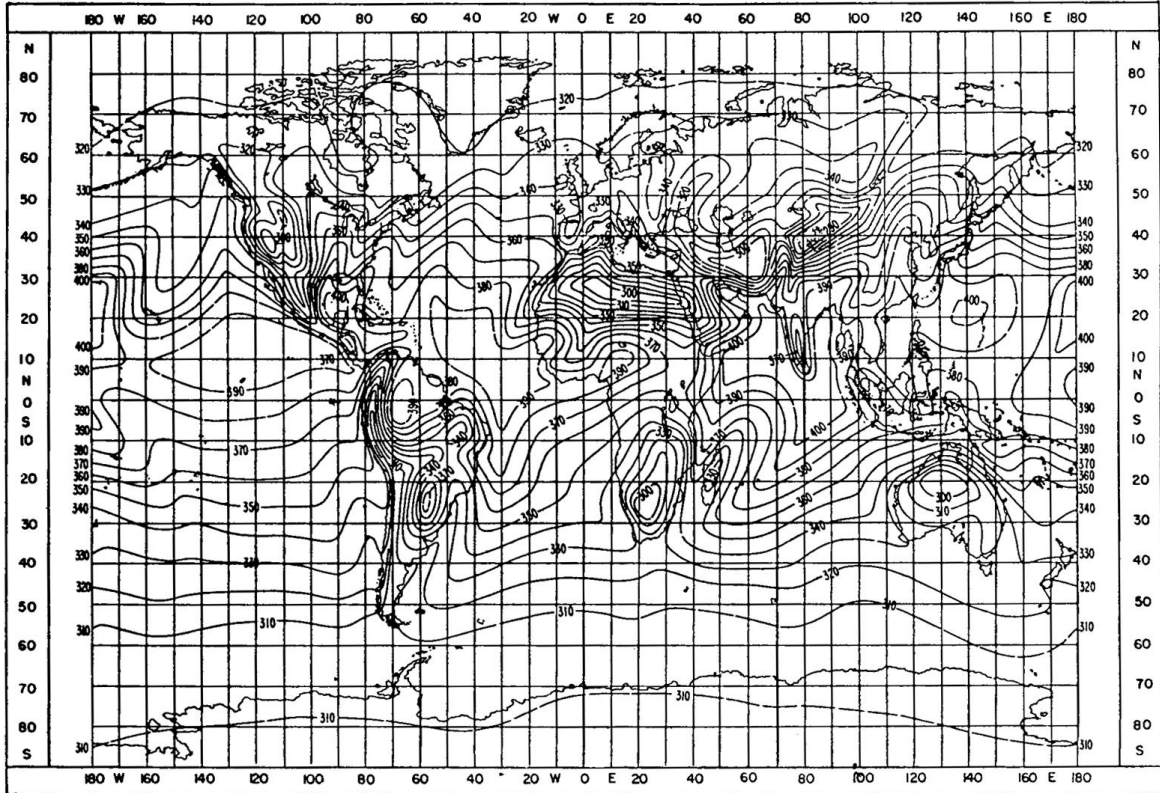
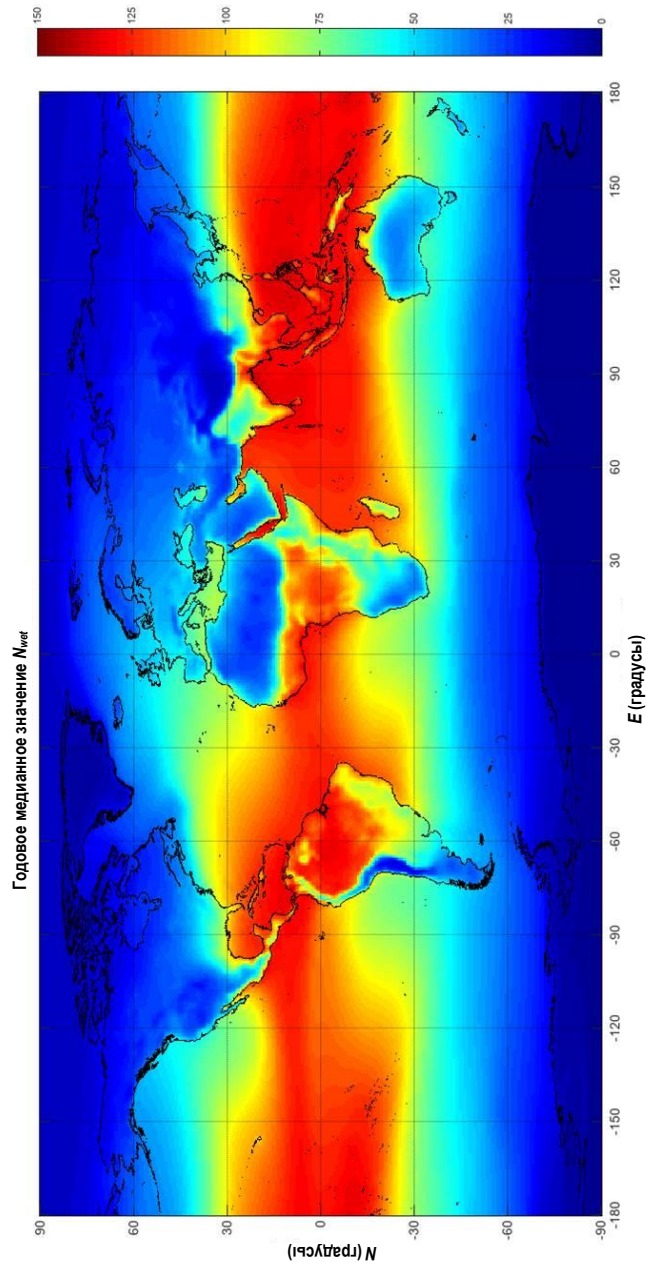


РИСУНОК 3

Влажностная составляющая приповерхностной рефракции (миллионных долей),
превышаемая в течение 50% времени года



3 Вертикальные градиенты рефракции

Статистические данные о вертикальном градиенте рефракции радиоволн в нижних слоях атмосферы являются важными параметрами при оценке просвета на трассе и явлений распространения радиоволн, таких как волноводное распространение на загоризонтных трассах, отражение от поверхности и замирания и искажения из-за многолучевости на наземных линиях прямой видимости.

3.1 В пределах первого километра атмосферы

На рисунках 4–7 представлены изоплеты уменьшения (то есть падения) помесечных средних значений рефракции радиоволн в пределах слоя толщиной 1 км от поверхности Земли. Изменение рефракции радиоволн ΔN рассчитывалось по формуле

$$\Delta N = N_s - N_1, \quad (13)$$

где N_1 – значение рефракции на высоте 1 км над поверхностью Земли. Значения ΔN не приводились к эталонной поверхности. Рисунки 4–7 были получены на основе набора данных, собранных за 5 лет (1955–1959 годы) от 99 станций запуска радиозондов. (Рисунки 4–7 отсутствуют в численной форме.)

Кроме того, годовые значения ΔN , превышаемые для 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8; 99,9% времени среднего года, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении. Помесечные значения ΔN , превышаемые для 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8; 99,9% времени среднего месяца, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении.

3.2 В нижних слоях атмосферы

Статистические данные о градиенте рефракции в пределах нижних 100 м над поверхностью Земли используются для оценки вероятности возникновения волноводного и многолучевого распространения. В том случае если отсутствуют более надежные локальные данные, такую статистику во всемирном масштабе можно получить из графиков на рисунках 8–11, которые были получены на основе набора данных, собранных за 5 лет (1955–1959 годы) от 99 станций запуска радиозондов. (Рисунки 8–11 отсутствуют в численной форме.)

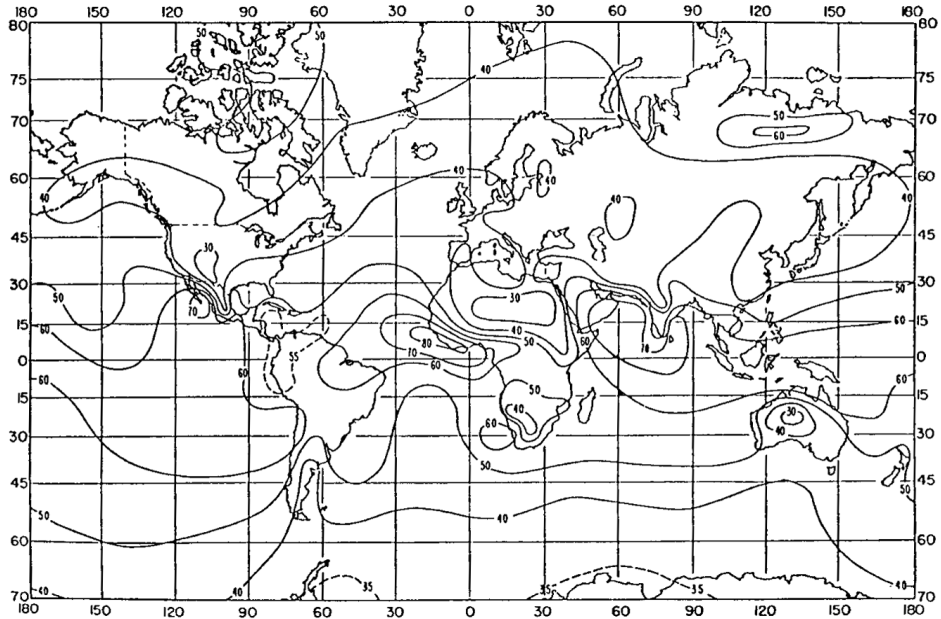
Кроме того, следующие параметры являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении:

- годовые значения градиента рефракции в пределах нижних 65 м от поверхности Земли ΔN_{65m} , превышаемые для 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8; 99,9% времени среднего года;
- помесечные значения градиента рефракции в пределах нижних 65 м от поверхности Земли ΔN_{65m} , превышаемые для 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 98; 99; 99,5; 99,8; 99,9% времени среднего месяца;
- процент времени в году или в месяце, для которого градиент рефракции ΔN на высоте более 100 м меньше $-100 N$ -единиц/км (%).

Данные расположены в интервале от 0° до 360° по долготе и от $+90^\circ$ до -90° по широте. Для мест, не совпадающих с узлами координатной сетки, градиент рефракции в требуемом месте можно получить путем билинейной интерполяции по значениям в четырех ближайших узлах координатной сетки, как это описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

РИСУНОК 4

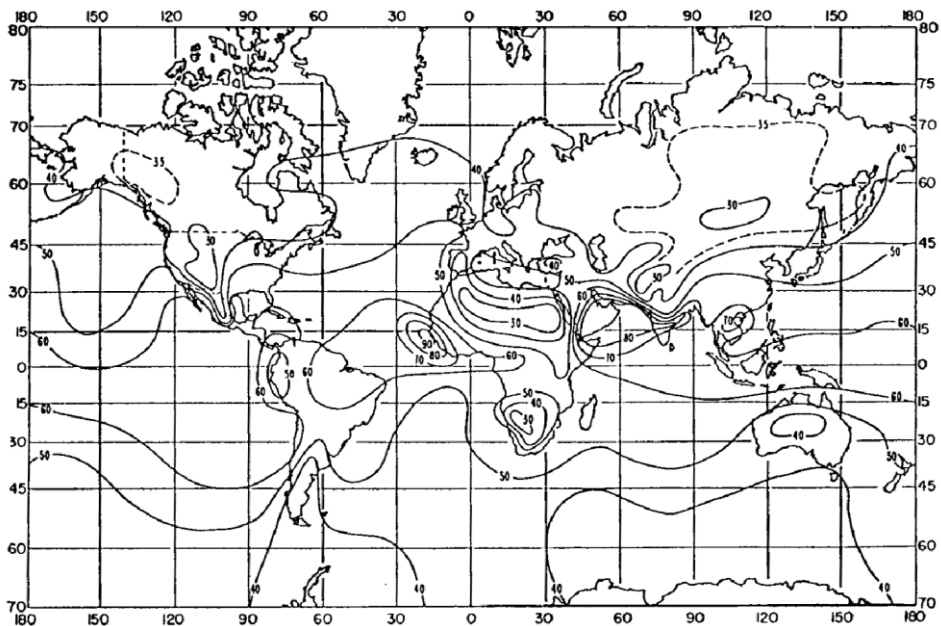
Помесячные средние значения ΔN , февраль



P0453-04

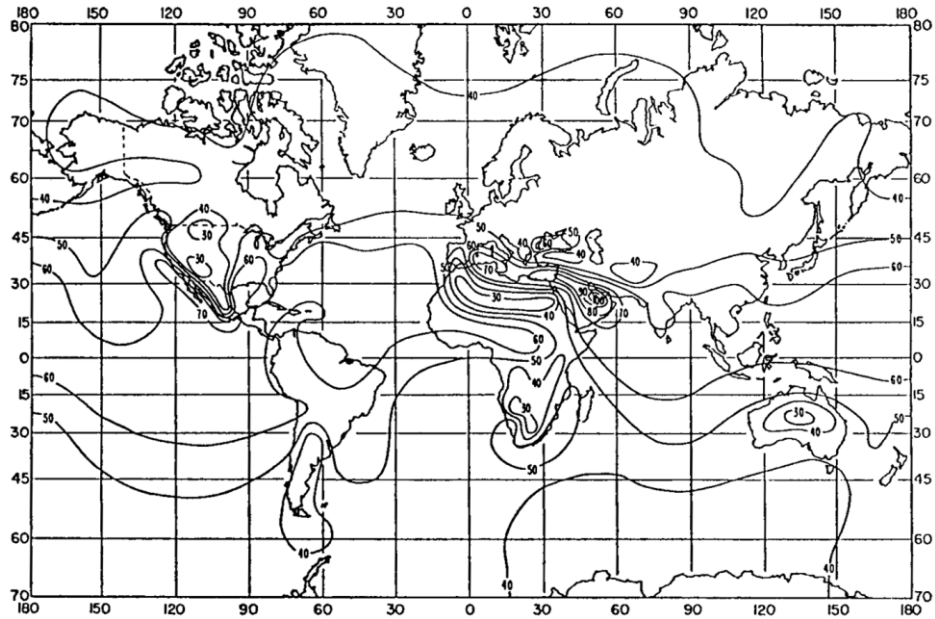
РИСУНОК 5

Помесячные средние значения ΔN , май



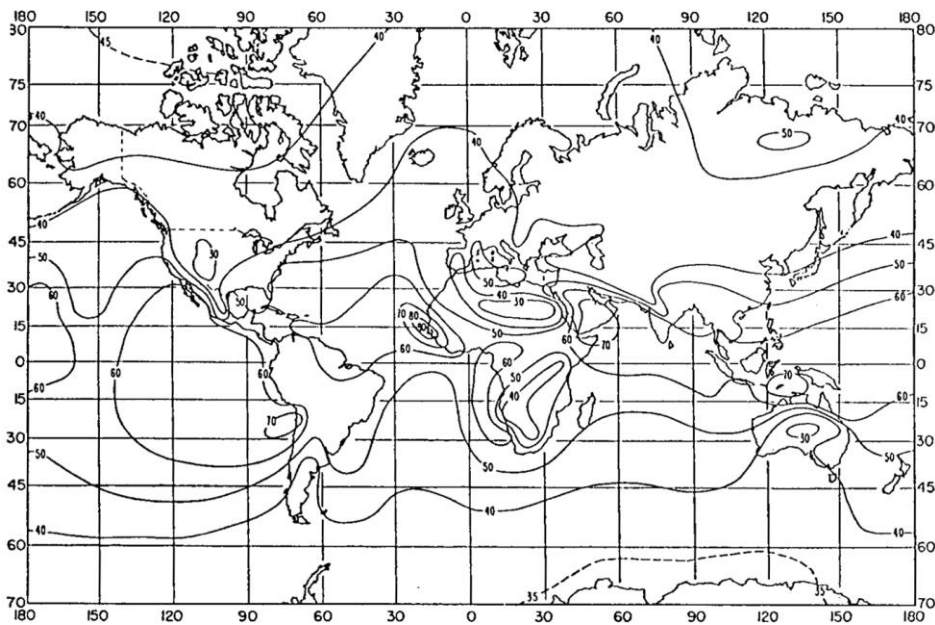
P0453-05

РИСУНОК 6

Помесячные средние значения ΔN , август

P.0453-06

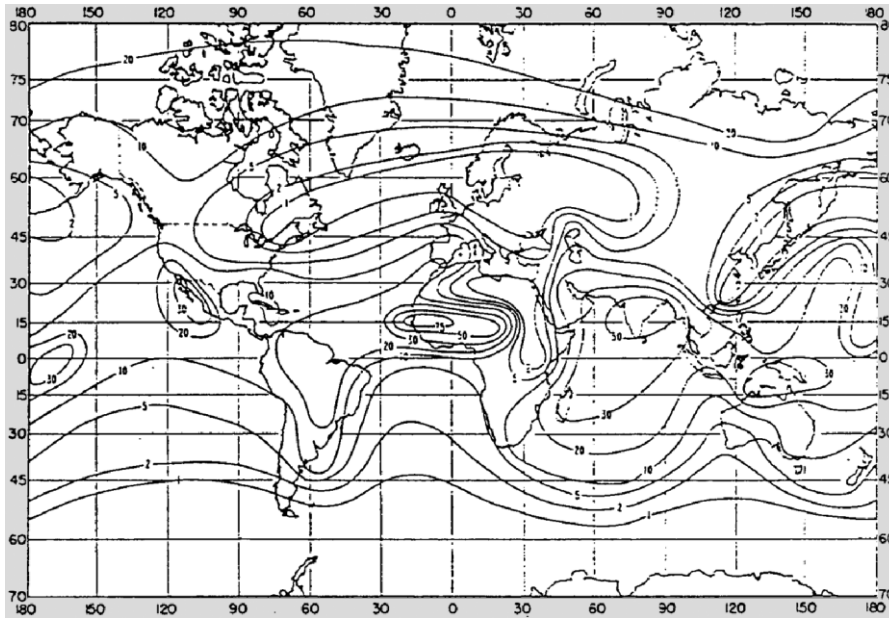
РИСУНОК 7

Помесячные средние значения ΔN , ноябрь

P.0453-07

РИСУНОК 8

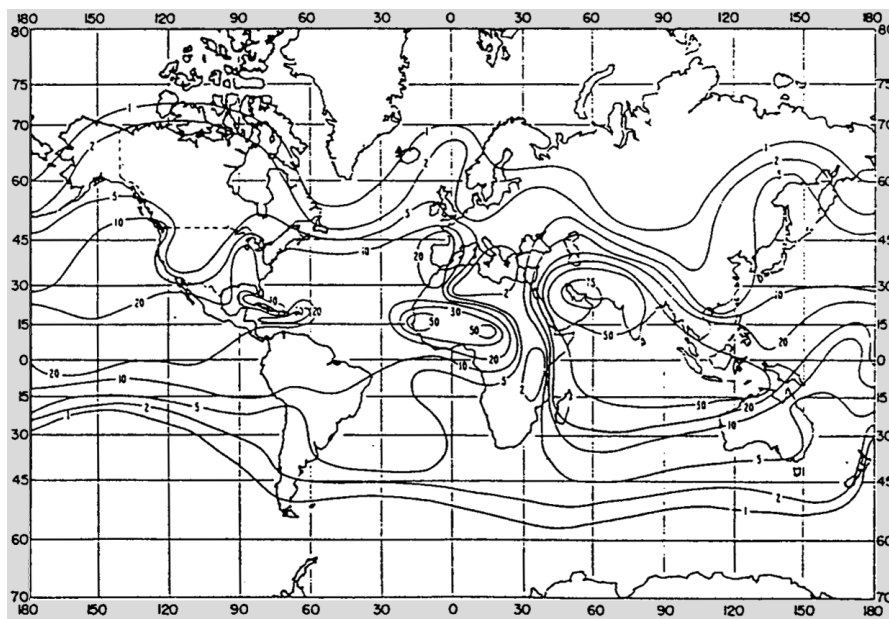
Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км), февраль



P.0453-08

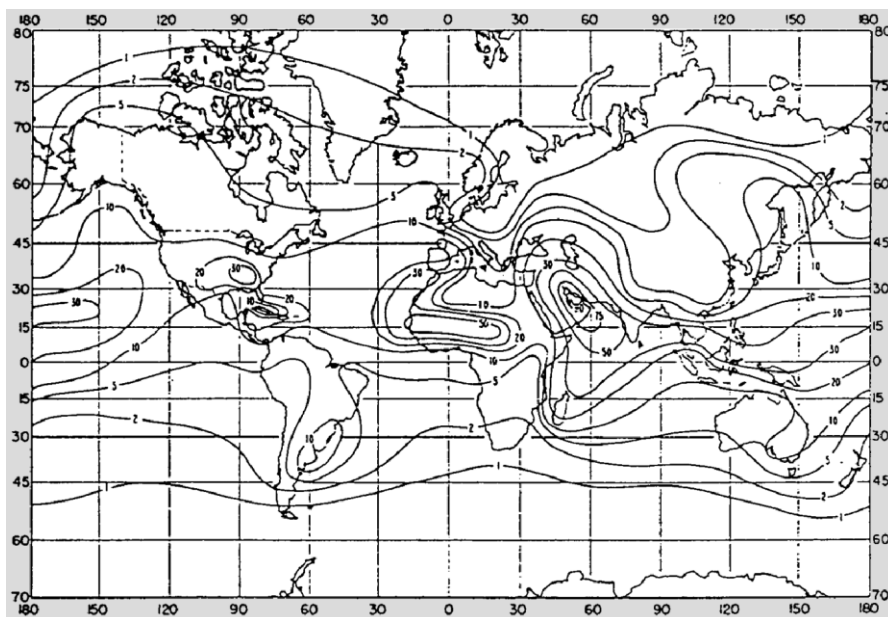
РИСУНОК 9

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км), май



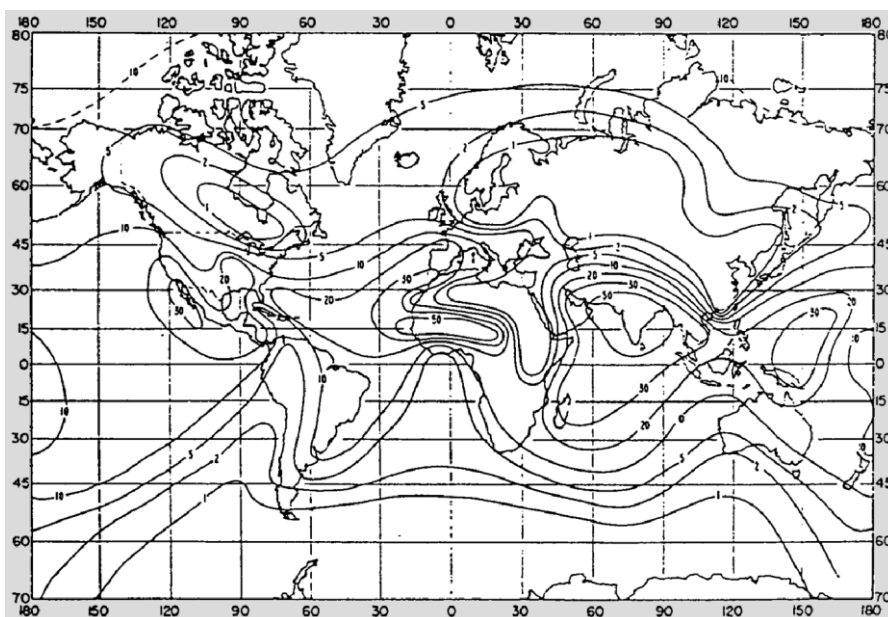
P.0453-09

РИСУНОК 10

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км), август

P0453-10

РИСУНОК 11

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км), ноябрь

P0453-11

4 Статистическое распределение градиентов рефракции

Полное статистическое распределение градиентов рефракции вблизи поверхности Земли в пределах нижних 100 м атмосферы можно оценить на основе медианного значения Med градиента рефракции и значения рефракции на уровне земли N_s для рассматриваемого места.

Медианное значение Med распределения градиента рефракции можно вычислить, зная вероятность P_0 того, что градиент рефракции остается меньше или равен D_n , с помощью следующего выражения:

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1, \quad (14)$$

где:

$$E_0 = \log_{10}(|D_n|);$$

$$k_1 = 30.$$

Уравнение (14) справедливо в интервале -300 N -единиц/км $\leq D_n \leq -40$ N -единиц/км. Если для исследуемого места вероятность P_0 , соответствующая любому заданному значению градиента рефракции D_n , неизвестна, то P_0 можно получить с помощью карт мира, приведенных на рисунках 8–11, где показан процент времени, в течение которого градиент рефракции в пределах нижних 100 м атмосферы остается меньше или равен -100 N -единиц/км.

В случае если более надежные локальные данные не доступны, N_s можно получить с помощью мировых карт рефракции на уровне моря N_0 , представленных на рисунках 1 и 2, и уравнения (12).

Для $D_n \leq Med$ кумулятивную вероятность D_n P_1 можно получить из уравнения

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}}, \quad (15)$$

где:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|;$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1);$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left(\frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1};$$

$$k_2 = \frac{1,6B}{120};$$

$$k_3 = \frac{120}{B}.$$

Уравнение (15) справедливо для значений $Med > 120$ N -единиц/км и для интервала -300 N -единиц/км $< D_n < 50$ N -единиц/км.

Для $D_n > Med$ кумулятивная вероятность $D_n P_2$ рассчитывается по формуле

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}}, \quad (16)$$

где:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|;$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1);$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left(\frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1};$$

$$k_4 = \left[\frac{100}{B} \right]^{2,4}.$$

Уравнение (16) справедливо для значений $Med > -120 N$ -единиц/км и для интервала $-300 N$ -единиц/км $< D_n < 50 N$ -единиц/км.

5 Приповерхностные и приподнятые волноводы

Атмосферные волноводы могут вызывать глубокие медленные замирания, серьезное усиление сигнала и замирания из-за многолучевости на наземных линиях прямой видимости, а также причинять значительные помехи на загоризонтных трассах. В связи с этим интерес представляет описание процесса возникновения волноводов и их структуры. В этом разделе приводятся статистические данные, которые были получены на основе наблюдений, проводившихся в течение 20 лет (1977–1996 годы) с помощью радиозондов на 661 станции запуска.

Волноводы описываются через измененную рефракцию, определяемую как

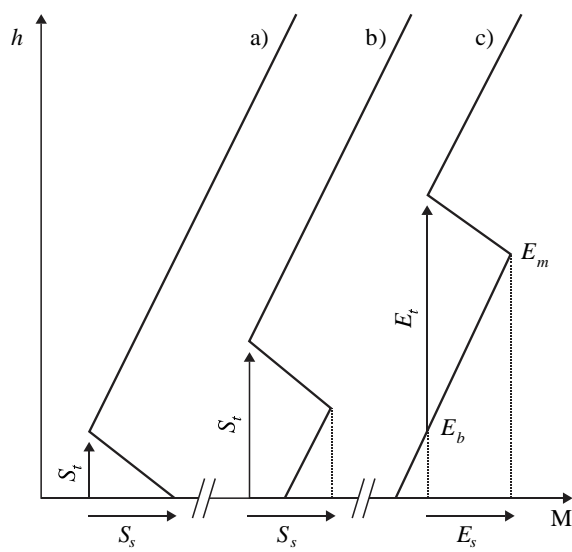
$$M(h) = N(h) + 157h \text{ (M-единиц)}, \quad (17)$$

где h – высота (км).

На рисунке 12 изображена измененная рефракция как функция высоты над уровнем земли и приведены определения типов волноводов. Волноводы могут быть трех типов – приповерхностные, промежуточные и приподнятые. В связи с малочисленностью случаев возникновения промежуточных волноводов по сравнению с приповерхностными волноводами, статистические данные были получены путем объединения этих двух типов в одну группу, называемую приповерхностными волноводами. Эти волноводы характеризуются интенсивностью S_s (M-единиц) или E_s (M-единиц), и толщиной S_t (м) или E_t (м). Для описания характеристик приподнятых волноводов используются два дополнительных параметра, а именно: высота нижней границы волновода E_b (м) и высота в пределах волновода с максимальным значением M , E_m (м).

РИСУНОК 12

Определение параметров, описывающих а) приповерхностные, б) промежуточные и с) приподнятые волноводы



P.0453-12

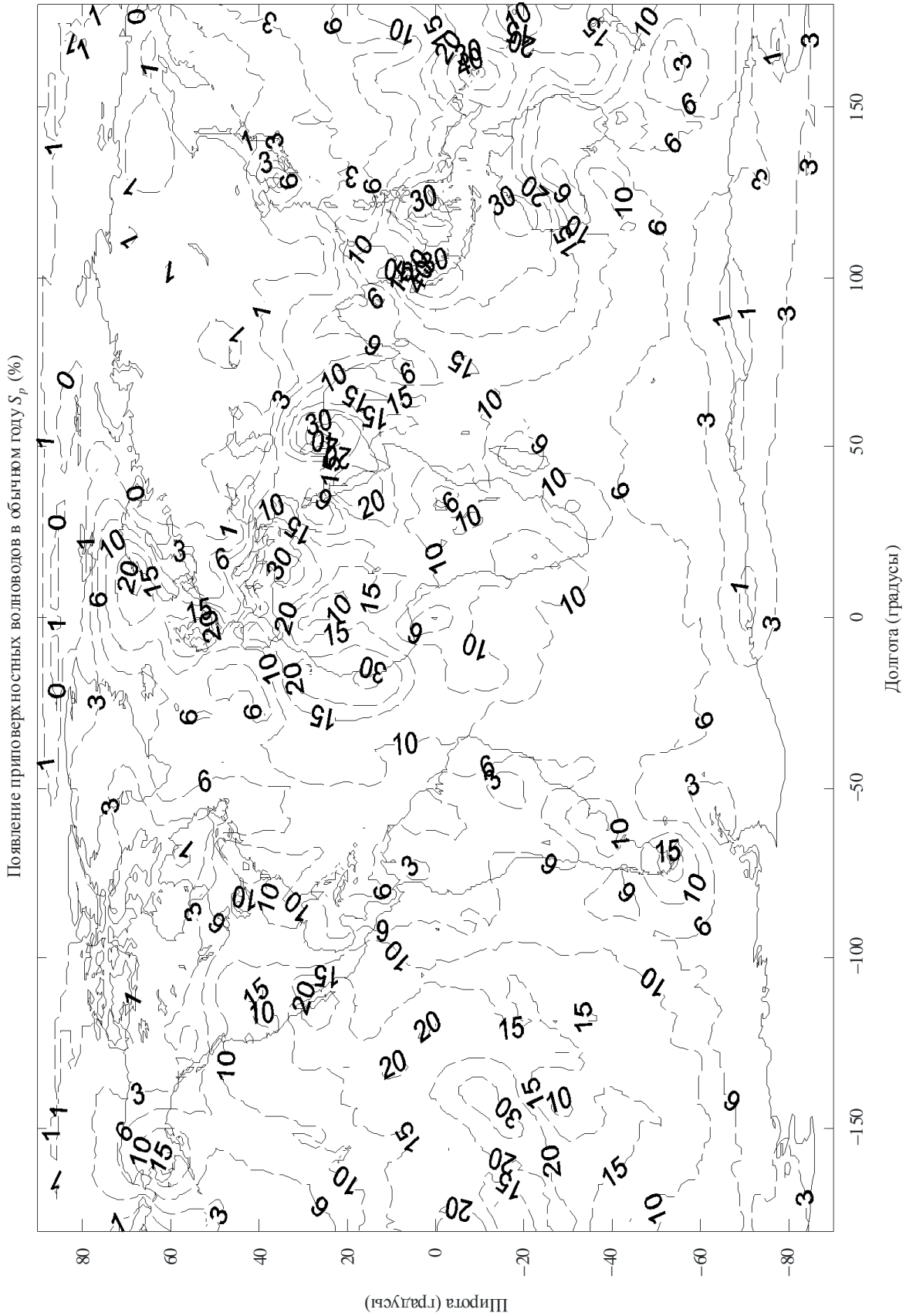
На рисунках 13–20 для удобства ссылки представлены данные, которые содержатся в файлах данных, упомянутых в подписях к этим рисункам. Статистические данные по приповерхностным и промежуточным волноводам были объединены в связи с малочисленностью случаев возникновения промежуточных волноводов.

Данные расположены в интервале от 0° до 360° по долготе и от $+90^\circ$ до -90° по широте с разрешением $1,5^\circ$. Для мест, не совпадающих с узлами координатной сетки, интересующие параметры в требуемом месте можно получить путем билинейной интерполяции по значениям в четырех ближайших узлах координатной сетки.

Файлы данных можно получить в БР.

РИСУНОК 13

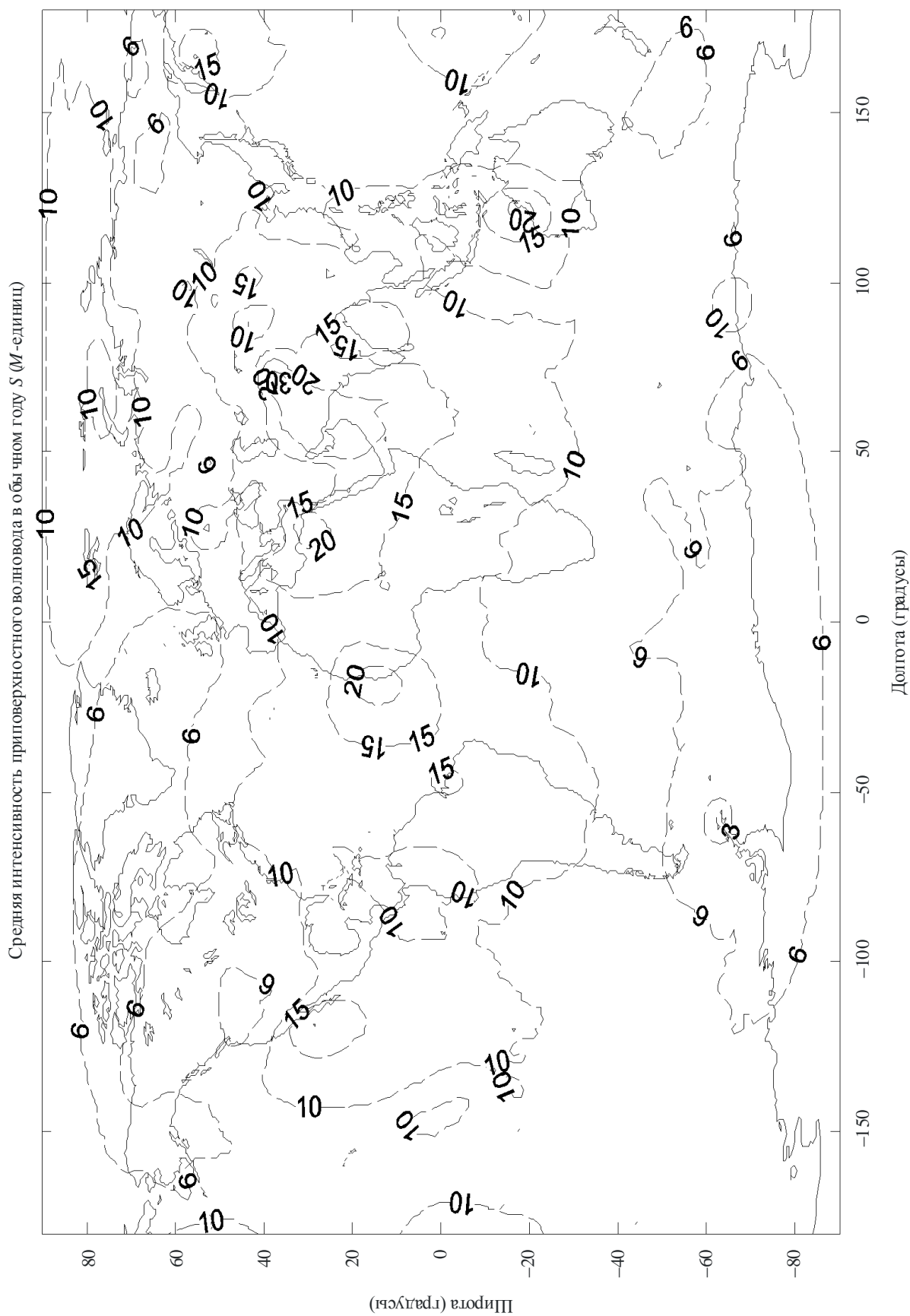
Название файла: S_OCCURRENCE.TXT



P.0453-13

РИСУНОК 14

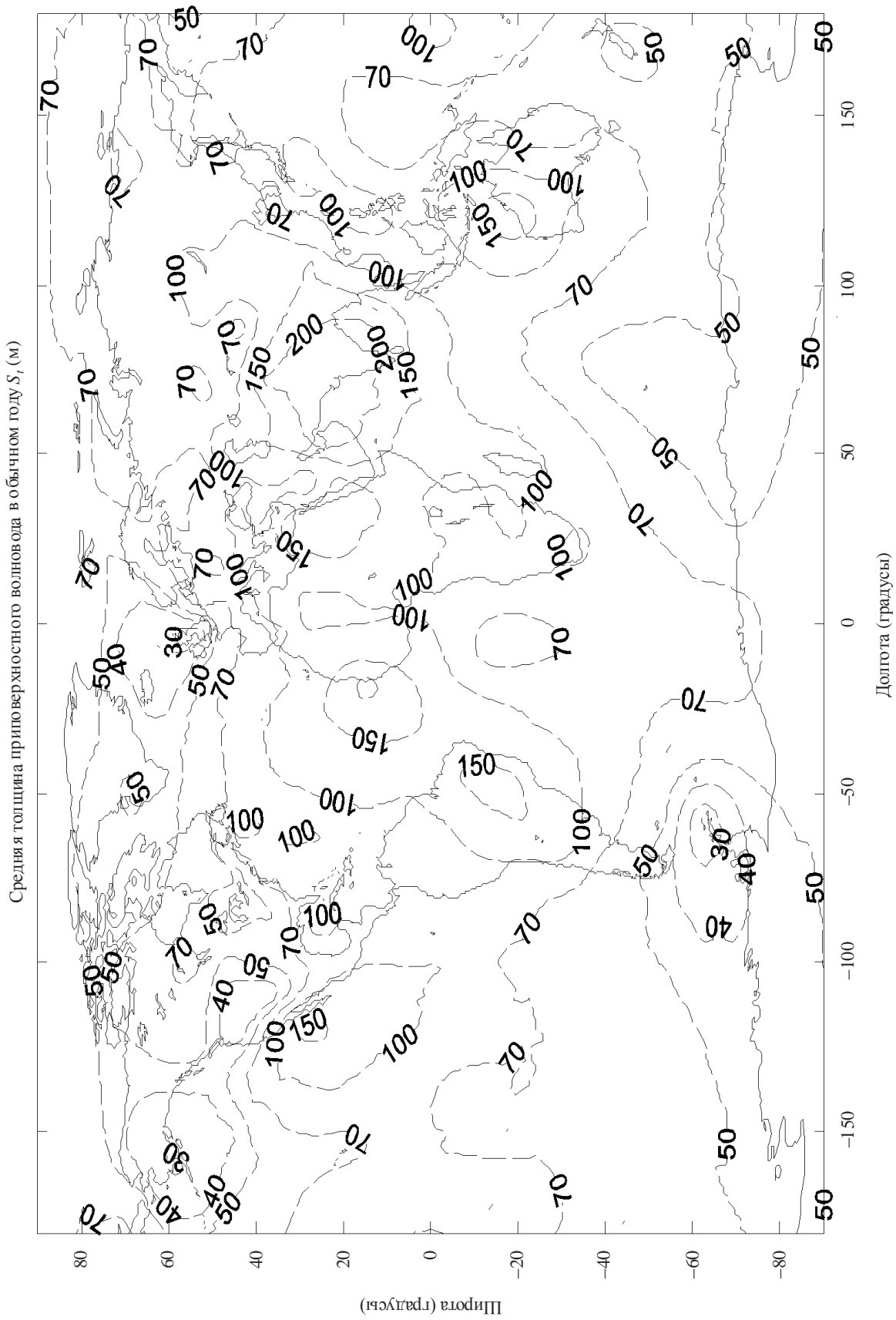
Название файла: S_STRENGTH.TXT



P0453-14

РИСУНОК 15

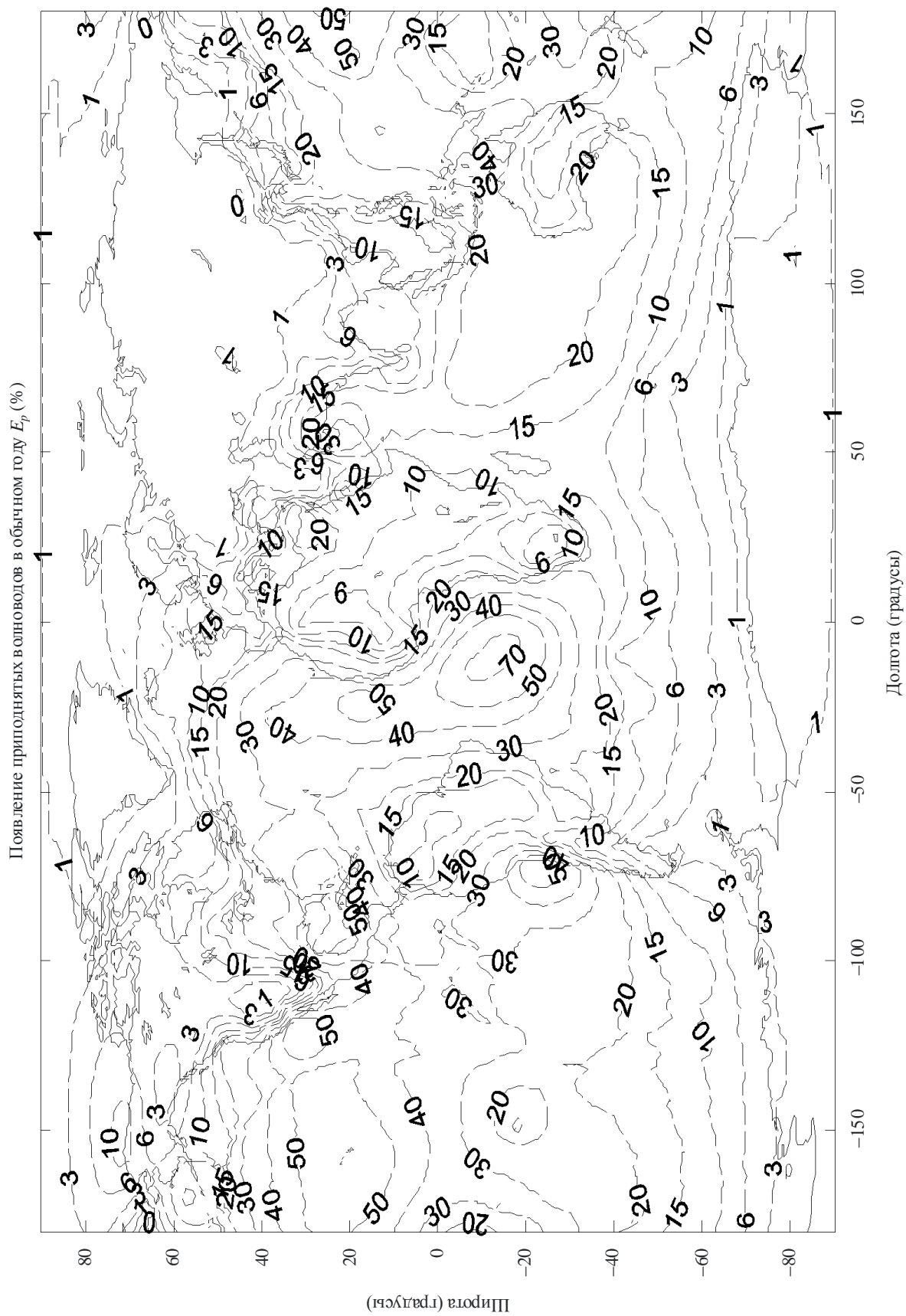
Название файла: S_THICKNESS.TXT



P:0453-15

РИСУНОК 16

Название файла: E_OCCURRENCE.TXT



P.0453-16

РИСУНОК 17

Название файла: E_STRENGTH.TXT

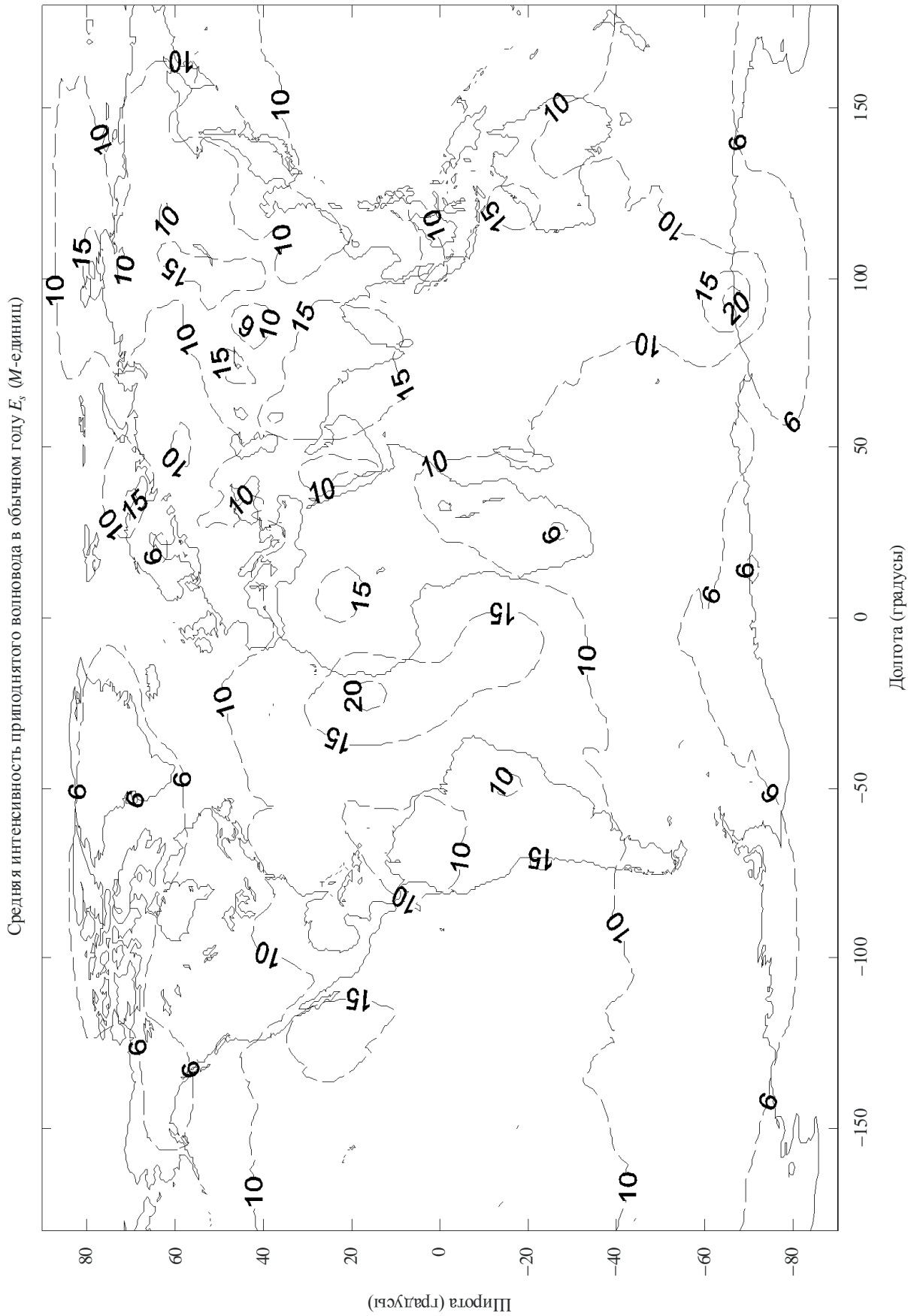
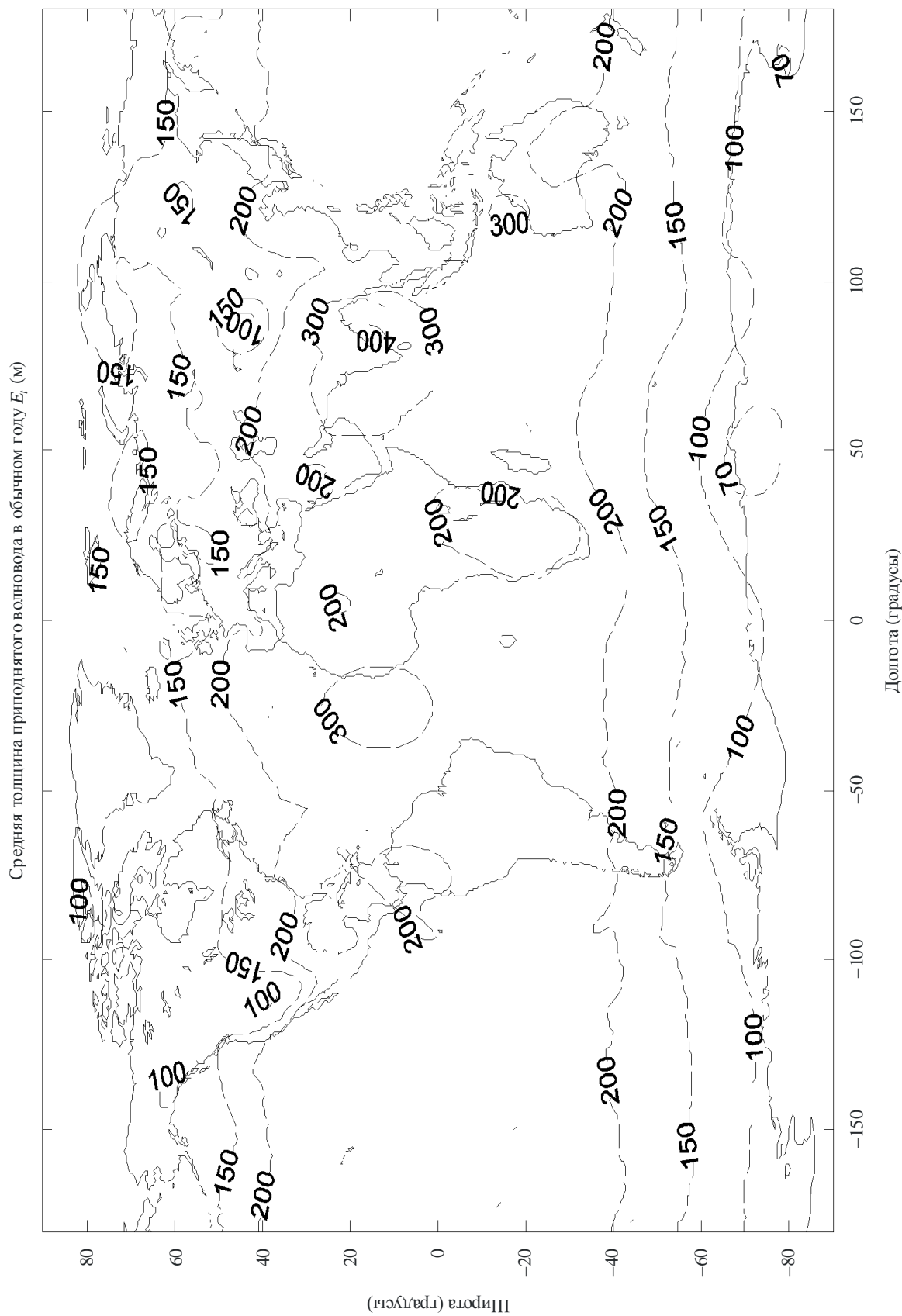


РИСУНОК 18

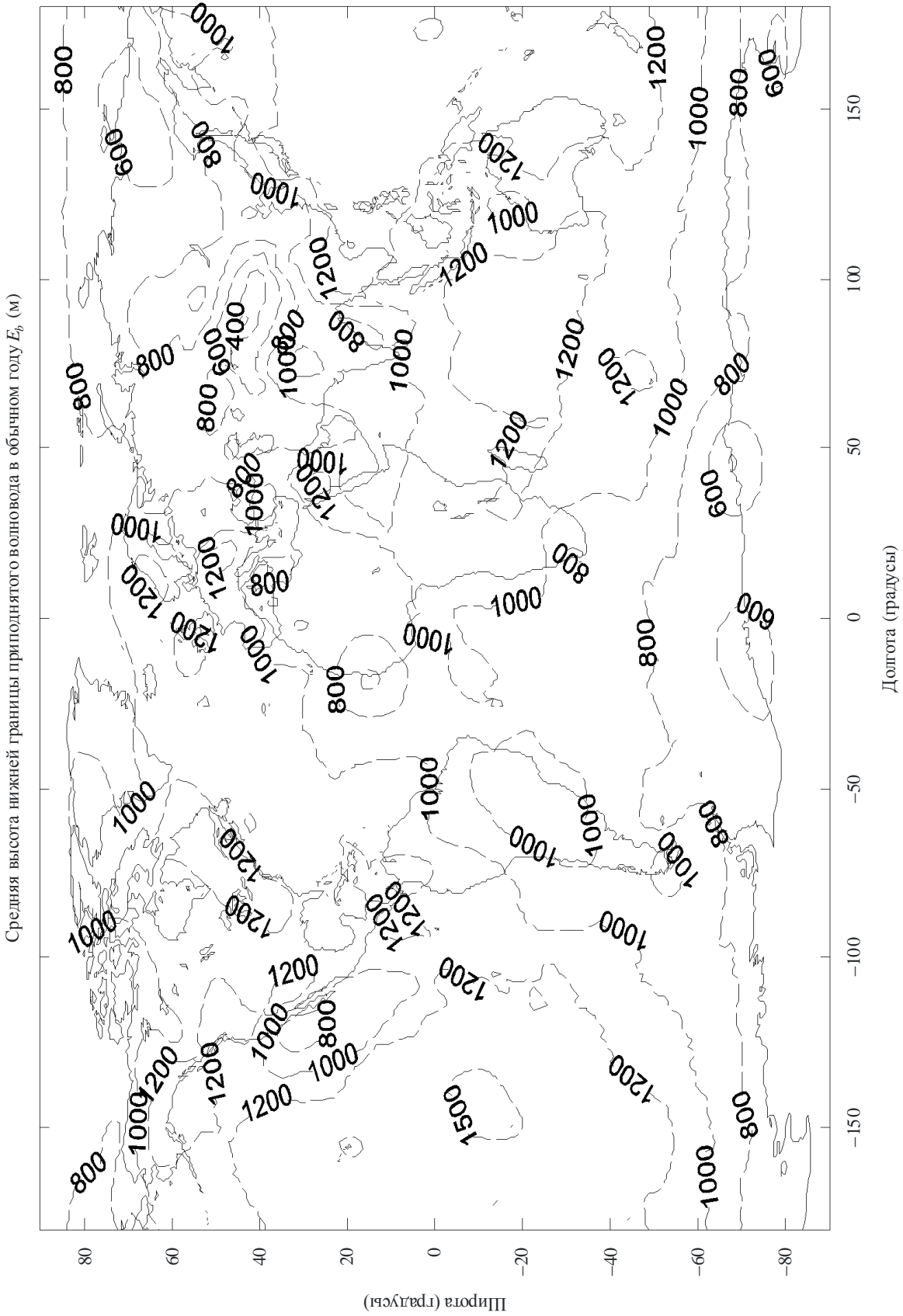
Название файла: E_THICKNESS.TXT



P:04-53-18

РИСУНОК 19

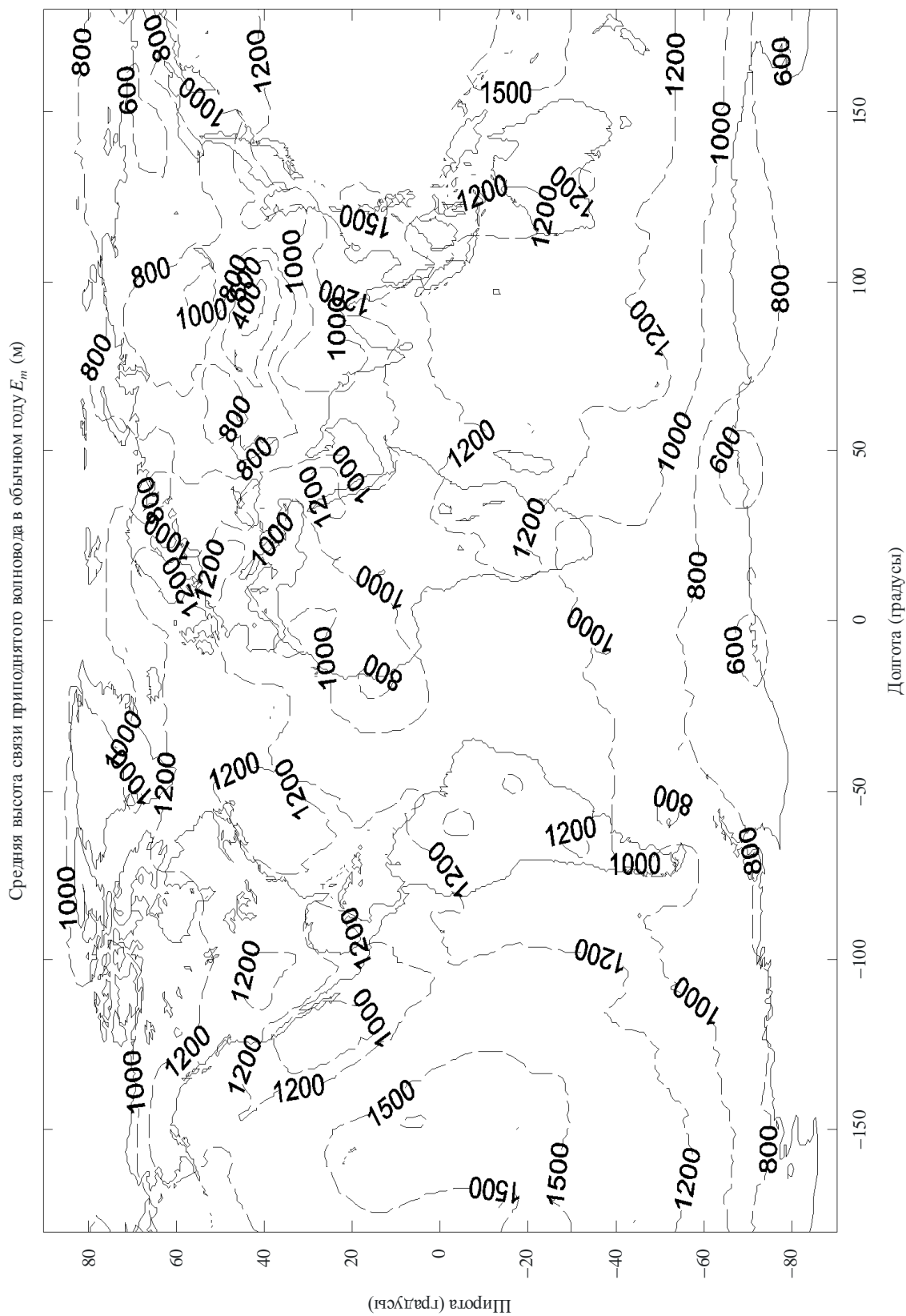
Название файла: E_BASE.TXT



P:0453-19

РИСУНОК 20

Название файла: E_MAX_M.TXT



P.04.53-20